



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VILLE VUORINEN

MATERIAALIA LISÄÄVÄN VALMISTUKSEN ENERGIA- TEHOKUUS – METALLISET JAUHEPETIMENETELMÄT

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Jorma Vihinen

30.5.2018

TIIVISTELMÄ

VILLE VUORINEN: Materiaalia lisäävän valmistuksen energiatehokkuus - metalliset jauhepetimenetelmät

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 27 sivua, 0 liitesivua

Toukokuu 2018

Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, Konetekniikka

Pääaine: Kone- ja tuotantotekniikka

Tarkastaja: Jorma Vihinen

Avainsanat: materiaalia lisäävä valmistus, jauhepetimenetelmät, energiatehokkuus, 3D-tulostus

Tässä työssä tehtiin kirjallisuusselvitys metallisten jauhepetimenetelmien energiatehokkuudesta, sillä materiaalia lisäävä valmistus on luonut uusia mahdollisuuksia valmistukseen. Näitä mahdollisuuksia ovat esimerkiksi valmistettavien tuotteiden osakomponenttien pienempi määrä ja kappaleiden suurempi kompleksisuus.

Työ on jaettu neljään osaan, joista ensimmäisessä tarkastellaan erilaisia materiaalia lisääviä jauhepetimenetelmiä ja niiden ominaisuuksia. Toisessa osassa tarkastellaan jauhepetimenetelmien energiankulutusta ja sen jakautumista eri toimilaitteille. Lisäksi tutkitaan prosessiin käytettävien materiaalien kuten metallijauheiden ja suojakaasujen sitoutunutta energiaa. Energiatehokkuuden kohdalla tarkastellaan menetelmien energiankulutukseen vaikuttavia asioita kuten valmistettavien kappaleiden poikkipinta-alaa ja korkeutta. Lisäksi pohditaan valmistusaikaa ja valmistuksessa käytettävien jauheiden kierrätystä. Viimeisessä osassa tarkastellaan tutkimuksia, joissa on vertailtu materiaalia lisäävää valmistusta ja koneistamista.

Jauhepetimenetelmien energiankulutus jakautuu useaan eri alueeseen, joiden osuus energiankulutuksesta riippuu paljon valmistettavista kappaleista. Energiatehokkuuteen vaikuttaa paljon kappaleiden poikkipinta-ala ja korkeus, joista jälkimmäinen vaikuttaa erityisesti siihen, kuinka monta valmistuskerrosta tarvitaan. Kappaleiden poikkipinta-ala ja määrä määrittävät sen kuinka tehokkaasti saatavissa oleva valmistustilavuus tulee käytettyä.

Vertailussa huomattiin, että jauhepetimenetelmien energiatehokkuus verrattuna koneistukseen riippuu valmistettavien kappaleiden muodoista, käytettävästä materiaalista ja valmistuksessa käytettävästä menetelmästä. Joissain tilanteissa materiaalia lisäävä valmistus on energiatehokkaampaa kuin koneistaminen.

ABSTRACT

VILLE VUORINEN: Energy efficiency in additive manufacturing – metallic powder-bed fusion

Tampere University of Technology

Bachelor of, 27 pages, 00 Appendix pages

May 2018

Degree Programme in Engineering Sciences, BSc (Tech)

Major: Mechanical and Production Engineering

Examiner: Jorma Vihinen

Keywords: additive manufacturing, powder-bed fusion, energy efficiency, 3D printing

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty osana Tampereen teknillisen yliopiston konetekniikan kandidatin tutkinto-ohjelmaa. Työssä on tarkasteltu materiaalia lisäävän valmistuksen energiatehokkuutta.

Haluan kiittää ohjaajaani Jorma Vihistä mielenkiintoisesta aiheesta ja hyvistä neuvoista työn tekemiseen.

Tampereella, 30.5.2018

Ville Vuorinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	JAUHEPETIMENETELMÄT	2
2.1	Metallin lasersintraus ja lasersintraus	2
2.2	Lasersulatus	2
2.3	Elektronisuihkusulatus	3
2.4	Yhteenveto eroista	5
3.	ENERGIANKULUTUS	6
3.1	Jauhepetimenetelmien energiankulutus	6
3.2	Osalaitteiden energiakulutus	8
3.2.1	Jauheen esilämmitys	9
3.2.2	Laser ja elektronisuihku	10
3.2.3	Jauheen levitys ja jauhepetien moottorit	10
3.2.4	Kappaleiden poisto ja jälkikäsittely	11
3.3	Eri menetelmien eroja	11
3.4	Jauheen valmistus	12
3.5	Suojakaasu	12
4.	ENERGIATEHOKKUUS	14
4.1	Valmistustilavuuden täyttö	14
4.1.1	Pohjapinta-ala ja poikkipinta-ala	14
4.1.2	Kappaleen korkeus ja orientaatio	16
4.2	Valmistusaika	17
4.3	Jauheen kierrätys	18
5.	VERTAILU KONEISTUKSEEN	19
6.	YHTEENVETO	23
	LÄHTEET	24

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Havainnekuva lasersintrauksen ja –sulatuksen menetelmästä (European Powder Metallurgy Association 2017, s. 10)</i>	<i>3</i>
Kuva 2.	<i>Arcam AB:n elektronisuihkusulatuslaitteen poikkileikkauksen periaatekuva (Arcam AB b)</i>	<i>4</i>
Kuva 3.	<i>Eri jauhepetimenetelmien energiankulutusten jakaumat</i>	<i>7</i>
Kuva 4.	<i>Faludin ja kumppaneiden tutkimuksen valmistusalojen täyttö (2017, s. 147)</i>	<i>8</i>
Kuva 5.	<i>Energiankulutuksen jakautuminen lasersintrauksessa ja lasersulatuksessa, perustuu lähteisiin (Sreenivasan & Bourell 2009, s. 259; Kellens et al. 2011, s. 8, 9)</i>	<i>9</i>
Kuva 6.	<i>Kappaleiden asettelu valmistusaloille (Baumers et al. 2012, s. 939).....</i>	<i>15</i>
Kuva 7.	<i>Tutkitut kappaleorientaatiot, perustuu lähteeseen (Mognol et al. 2006).....</i>	<i>16</i>
Kuva 8.	<i>Testikappale (Kahya et al. 2018, s. 7)</i>	<i>19</i>
Kuva 9.	<i>Testikappale (Baumers 2012, s. 88)</i>	<i>20</i>
Kuva 10.	<i>Tutkimuksessa tarkastellut testikappaleet (Priarone et al. 2017, s. 193).....</i>	<i>21</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CNC	engl. Computerized Numerical Control, tietokoneistettu numeerinen ohjaus
DMLS	engl. Direct Metal Laser Sintering, metallinlasersintraus
EBM	engl. Electron Beam Melting, elektronisuihkusulatus
SLM	engl. Selective Laser Melting, lasersulatus
SLS	engl. Selective Laser Sintering, lasersintraus
°C	Celcius
μm	mikrometri
cm ³	kuutiosenttimetri
h	tunti
kg	kilogramma
kWh	kilowattitunti
m ³	kuutiometri
m ³ /h	kuutiometri per tunti
min	minuutti
MJ	megajoule
MJ/cm ³	megajoule per kuutiosenttimetri
MJ/kg	megajoule per kilogramma
m/s	metriä per sekunti
mm/s	millimetriä per sekunti

1. JOHDANTO

Materiaalia lisäävää valmistusta tai 3D-tulostusta on käytetty pikamallinnukseen tuotesuunnittelun apuna. Pikamallinnuksella on saatu nopeasti ja helposti fyysinen kolmiulotteinen malli, jonka tutkimisen perusteella on voitu tehdä muutoksia tuotesuunnitelmaan. Sen avulla on voitu vähentää lisäksi suunnittelun aikaisia kustannuksia. Materiaalia lisäävän valmistuksen etuina pidetään muun muassa valmistettavien kappaleiden kompleksisuutta verrattuna perinteisillä menetelmillä valmistettuihin kappaleisiin. Kompleksisuuden seurauksena valmiiden tuotteiden osakomponenttien määriä ja valmistuksen eri vaiheiden määriä on saatu vähennettyä. (Gibson et al. 2015, s. 11) Valmistettavista kappaleista on mahdollista tehdä kevytrakenteisia ja kevyempiä valmistuksen mahdollistamalla tuoteoptimoinnilla.

Materiaalia lisäävällä valmistuksella on kuitenkin vielä heikkouksia, kuten valmistusprosessin hitaus, heikko pinnanlaatu, suuremmat toleranssit ja valmistuslaitteiden kallis hinta (Gutowski et al. 2017, s. 70). Nämä heikkoudet rajoittavat materiaalia lisäävien järjestelmien laajempaa käyttöä erityisesti korkean volyymin tuotannossa ja ovat kehittämistä vaativia kohteita.

Kestävän kehityksen tavoittelu ja ilmastonmuutoksen hidastaminen asettavat tavoitteita yritysten sähkön ja energian kulutukselle, joten on tärkeää tutkia menetelmiä, joilla valmistustekniikoita saadaan vähemmän energiaa kuluttaviksi. Teollisuuden energiankulutus oli Suomessa vuonna 2016 lähes puolet energian loppukulutuksesta (Tilastokeskus), joten valmistuksen energiatehokkuuden tavoittelu on tärkeää ja lisäksi taloudellista, jos energiakustannuksissa voidaan säästää.

Tämän työn tarkoituksena on selvittää materiaalia lisäävän valmistuksen energiatehokkuutta kirjallisuuden avulla. Työ on rajattu koskemaan jauhepetimenetelmiä ja metallisten tuotteiden valmistusta. Työssä myös vertaillaan materiaalia lisäävän valmistuksen energiatehokkuutta perinteisiin menetelmiin kirjallisuudesta löytyvien tutkimusten pohjalta.

Työssä käydään läpi ensin erilaisia materiaalia lisääviä jauhepetimenetelmiä, jonka jälkeen tarkastellaan sitä, mistä energiankulutus koostuu jauhepetimenetelmissä. Energiankulutuksen jälkeen tarkastellaan energiatehokkuutta ja siihen vaikuttavia asioita. Viimeisenä vertaillaan jauhepetimenetelmiä koneistukseen energiankulutuksen ja energiatehokkuuden kannalta.

2. JAUHEPETIMENETELMÄT

Tässä luvussa käydään läpi materiaalia lisäävän valmistuksen jauhemenetelmien toimintaperiaatteita ja niiden eroavuuksia. Kaikissa materiaalia lisäävissä jauhepetimenetelmissä valmistusprosessi on pääpiirteittäin samanlainen. Ennen varsinaista valmistusta tehdään kolmiulotteinen tietokonemalli, jonka valmistava laite jakaa ohuiksi tasoiksi. Valmistus aloitetaan levittämällä metallijauhetta kerros valmistusalustalle, johon sen jälkeen sulatetaan tai sintrataan kiinteäksi tietokonemallin ensimmäisen tason kuvio. Tämän jälkeen petiä lasketaan kerrospaksuuden verran alaspäin ja metallijauhetta levitetään uusi kerros, joka jälleen sulatetaan tai sintrataan. Näitä vaiheita toistetaan, kunnes laite saa tietokonemallin mukaisen kappaleen valmistettua. (Vayre et al. 2012, s. 90) Kappaleen valmistuttua jauhepeti nostetaan ylös puhdistamista varten ja laitteen käyttäjä poistaa ja kerää ylimääräisen jauheen mahdollisimman hyvin talteen (Faludi et al. 2017, s. 145). Ylimääräinen jauhe voidaan käyttää uudestaan seuraavassa kierrossa.

Kappaleet rakennetaan eri menetelmissä erillisen valmistusalustan päälle, jolloin kappaleeseen siirtynyttä lämpöä saadaan johdettua laitteen runkoon ja estettyä lämmön aiheuttamia muodonmuutoksia (Baumers et al. 2012, s. 935).

2.1 Metallin lasersintraus ja lasersintraus

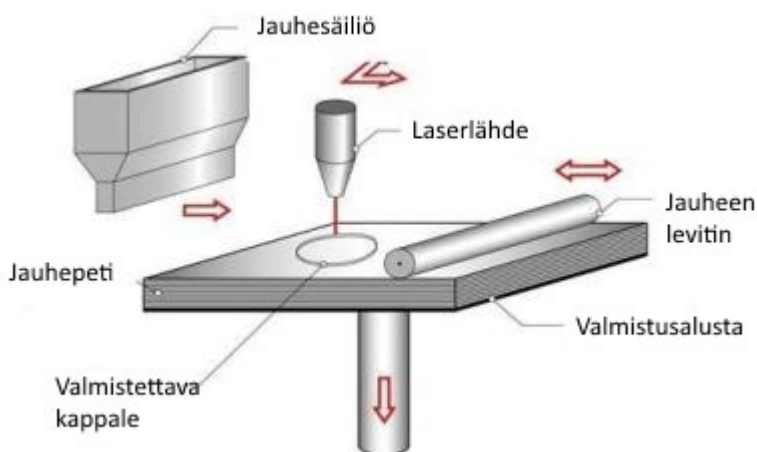
Lasersintrausmenetelmät Direct Metal Laser Sintering (DMLS) ja Selective Laser Sintering (SLS) ovat materiaalia lisäävän valmistuksen menetelmiä, joissa metallijauheseoksesta tehdään kiinteää kappale sulattamalla metallijauheseosta sellaisella lämpötilalla, joka sulattaa alemman sulamispisteen omaavan aineen ja jättää toisen aineen kiinteäksi (Gibson et al. 2015, s. 116). Saksalainen EOS GmbH oli ensimmäinen yritys, joka kaupallisti DMLS-tekniikan ja alkoi asentaa DMLS-laitteita vuonna 1995 (Shellabear & Nyrhilä 2004, s. 6).

SLS-menetelmä kehitettiin Teksasin yliopistossa, ja se oli ensimmäinen kaupallinen materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä (Gibson et al. 2015, s. 107). Molemmilla menetelmillä voidaan valmistaa metallisia tuotteita, mutta pelkällä lasersintrauksella valmistetaan kappaleita myös muista materiaaleista toisin kuin DMLS:llä. Nykyään metallijauheita ei enää sintrata vaan kaikki menetelmät sulattavat metallijauhetta. EOS kuitenkin käyttää tuotteissaan nimitystä DMLS. DMLS-prosesseissa valmiiden kappaleiden suhteellinen tiheys voi olla yli 99 % (Shellabear & Nyrhilä 2004).

2.2 Lasersulatus

Selective Laser Melting (SLM) eli lasersulatus eroaa lasersintrausmenetelmistä siten, että sintrauksen sijaan metallijauhe sulatetaan kokonaan käyttämällä tehokkaampaa laseria

(Vayre et al. 2012, s. 92). Näin kappaleista saadaan täysin kiinteitä. Metallijauhetta sulatettaessa tulee laserin tuoda tarpeeksi lämpöenergiaa, jotta uusi kerros yhdistyy aiempaan kerrokseen. Laser ei kuitenkaan saa höyrystää materiaalia, jotta säästytään materiaalihukalta. (Gutowski et al. 2017, s. 72) Kuvassa 1 on havainnollistettu lasersintrauslaitteiden ja lasersulatuslaitteiden rakennetta ja toimilaitteita.



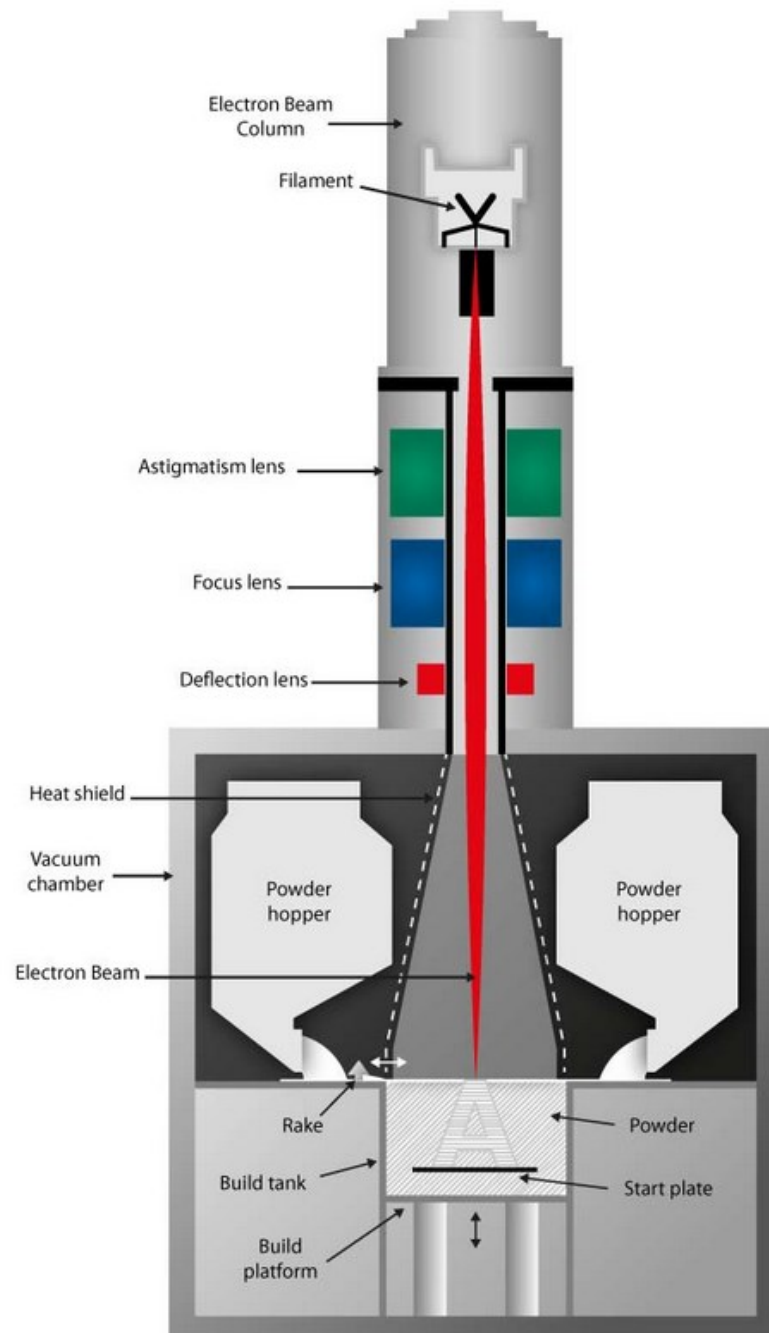
Kuva 1, Havainnekuva lasersintrauksen ja –sulatuksen menetelmästä (European Powder Metallurgy Association 2017, s. 10)

Samoin kuin lasersintrausmenetelmissä, lasersulatuksen valmistusprosessi etenee suljetussa kammiossa, jossa hapen määrä on minimoitu ja kammioon syötetään typpeä tai argonia metallijauheen suojaksi estämään hapettumista (Herzog et al. 2016, s. 372). Suoja-kaasu helpottaa lisäksi valmistuksen jälkeen osien jäähtymistä hyvän lämmönjohtavuutensa vuoksi (Murr et al. 2012, s. 3).

2.3 Elektronisuihkusulatus

Elektronisuihkusulatuksen eli Electron Beam Melting (EBM) menetelmän nimitys tulee siitä, että laite käyttää metallijauheen sulatuksen energialähteenä elektronisuihkua laserin sijaan (Vayre et al. 2012, s. 92). Elektronisuihkun käyttäminen on suurin yksittäinen ero lasersulatusprosessiin, vaikka menetelmät ovat muutoin hyvin samanlaiset. Suihkun ohjaamiseen käytetään vähän liikkuvia osia, joten sen skannausnopeus on huomattavasti suurempi kuin laserin skannausnopeus (Vayre et al. 2012, s. 92). Muita elektronisuihkusta johtuvia eroja verrattuna laserimenetelmiin ovat käytettävien materiaalien rajoittuminen sähköä johtaviin metalleihin, sillä elektronisuihku varaa metallijauheen negatiivisesti ja tämä varaus tulee saada johdettua pois. Jauheen varautumisen vuoksi sulatuksessa täytyy välttää varausten keskittymistä tietyille alueille. Elektronisuihkun laseriin verrattuna suurempi säde vaikuttaa myös valmiin kappaleen pinnankarheuteen ja kerrospaksuuteen. Elektronisuihkusulatuksessa jauhepedillä on myös korkeampi lämpötila ja siitä johtuva kappaleiden pienempi jäännösjännitys. (Gibson et al. 2015, s. 138, 139)

EBM-menetelmän erona laseria käyttäviin menetelmiin on myös se, että jauheen sulatus tehdään tyhjiöolosuhteissa eikä erillistä suojakaasua tarvita (Murr et al. 2012, s. 3). Kuitenkin tyhjiöön lisätään heliumia, joten kammion paine nousee hieman (Baumers et al. 2010, s. 283). Ruotsalainen Arcam AB tekee ainoana maailmassa EBM-järjestelmiä (Frazier 2014, s. 1918). Kuvassa 2 on esitettyä elektronisuihkusulatuslaitteen poikkileikkaus.



Kuva 2, Arcam AB:n elektronisuihkusulatuslaitteen poikkileikkauksen periaatekuva (Arcam AB b)

2.4 Yhteenveto eroista

Taulukkoon 1 on koottu eri menetelmien oleellisia eroja. Erot vaikuttavat menetelmien energiankulutukseen ja valmistettavien tuotteiden laatuun sekä ominaisuuksiin.

Taulukko 1, Yhteenveto eri menetelmien eroavaisuuksista

	DMLS / SLS	SLM	EBM
Energialähde	Laser	Laser	Elektronisuihku
Menetelmä	Sintraus	Sulatus	Sulatus
Kerrospaksuus	20-100 μm^2	30-100 μm^2	50 μm^1
Olosuhteet	Suojakaasu	Suojakaasu	Tyhjiö (lisänä heliumia)
Lämpötila	100-300 °C	100-300 °C	700 °C
¹ (Sames et al. 2016, s. 7), ² (Baumers et al. 2011, s. 31)			

Taulukosta nähdään, että lasersulatus ja lasersintraus vastaavat toisiaan, kun taas elektronisuihkusulatus eroaa selkeästi lasermenetelmistä. Elektronisuihkusulatuksella saadaan tarvittaessa sulatettua paksumpia jauhekerroksia kuin lasermenetelmillä. Tämä on hyödyllistä, jos kappaleen mittatarkkuuksien ja lujuusominaisuuksien ei tarvitse olla hyvät ja jos kappale tarvitsee valmistaa nopeasti. Lasersintrauksella tehtyjen kappaleiden pinnat ovat lähes kaksi kertaa sileämpi verrattuna elektronisuihkusulatuksella valmistettuihin (Frazier 2014, s. 1923).

3. ENERGIANKULUTUS

Tässä luvussa tarkastellaan materiaalia lisäävän valmistuksen energiankulutusta ja sen jakaantumista laitteiden eri toimilaitteille. Lisäksi tarkastellaan muita materiaalia lisäävään valmistukseen vaikuttavia elementtejä kuten käytettävien metallijauheiden valmistusta ja suojakaasun kulutusta.

Energiankulutuksen jakautuminen on tärkeä tietää, jotta laitteiden energiankulutusta voidaan vähentää ja optimoida. Tieto auttaa myös keskittymään oleellisiin toimilaitteisiin, jotka vaikuttavat prosessin energiankulutukseen ja tuotteen laatuun eniten.

3.1 Jauhepetimenetelmien energiankulutus

Jauhepetimenetelmien energian ominaiskulutuksia on koottu taulukkoon 2. Energian ominaiskulutus on käytetty energia valmistettua kiloa kohden (MJ/kg). Taulukosta löytyy tutkimuksissa käytetyt menetelmät ja käytetyt materiaalit. Energiankulutus kohdassa on eri sarakkeet yksittäisille valmistetuille kappaleille ja useammalle kappaleelle tai täydelle valmistusalustan käytölle. Näin voidaan vertailla yksittäisten kappaleiden energian ominaiskulutuksen arvoja useamman kappaleen valmistukseen.

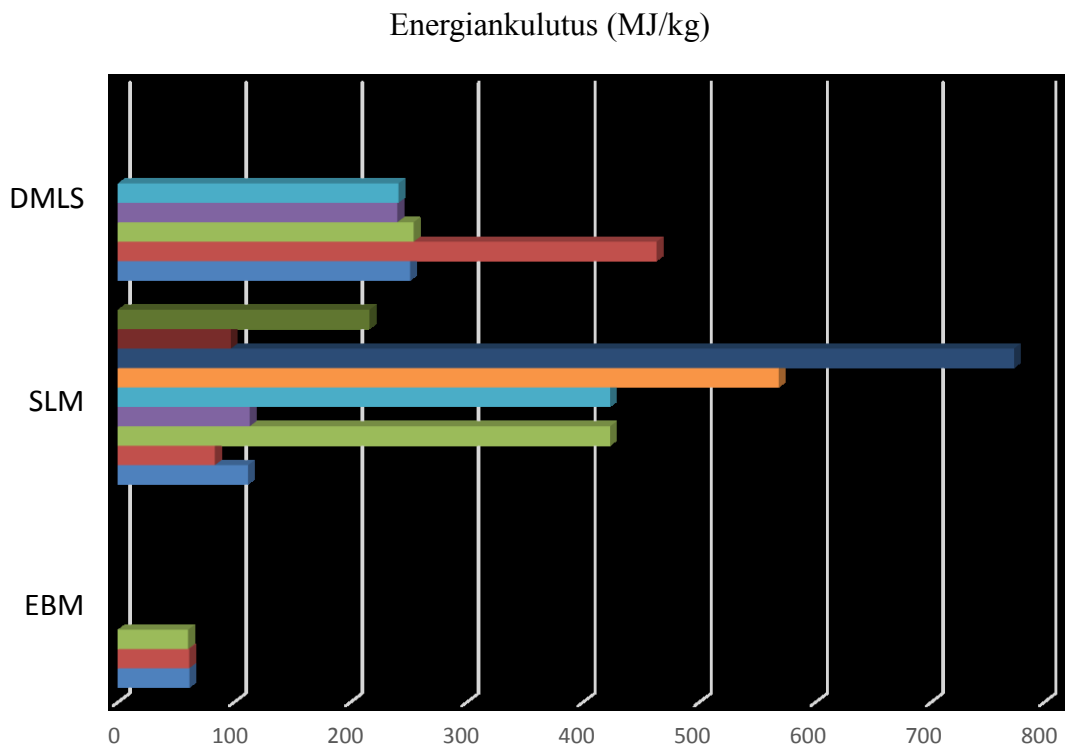
Taulukko 2, Energiankulutukset eri menetelmillä

Tutkimus	Menetelmä	Materiaali	Energian ominaiskulutus (MJ/kg)	
			1 kpl	Täysi / useita
Baumers et al. 2010	EBM	Ti-6Al-4V	-	61,2 *
	SLM	Ruostumaton teräs SAE 316L	-	111,6 *
Baumers et al. 2011	EBM	Ti-6Al-4V	177	61
	SLM	Ruostumaton teräs 316L	106	83
	SLM	Ruostumaton teräs 316L	588	423
	DMLS	Ruostumaton teräs 17-4 PH	339	241
Baumers 2012	SLM	Ruostumaton teräs 316L	141	113
	SLM	Ruostumaton teräs 316L	583	423
	DMLS	Ruostumaton teräs 17-4 PH	337	240
Baumers et al. 2012	DMLS	Ruostumaton teräs 17-4 PH	251 - 463	
Baumers et al. 2013	DMLS	Ruostumaton teräs 17-4 PH	-	254 *
Baumers et al. 2016	EBM	Ti-6Al-4V	-	59,96
Faludi et al. 2017	SLM	Silumiini	1 188 - 1 764 *	568 - 773 *
Gebbe et al. 2015	SLM	X12Cr13	3 413 *	-
Kellens et al. 2011	SLM	Ruostumaton teräs 316L	-	96,8 *
Mognol et al. 2006	DMLS	-	115,2 - 201,6 MJ *	-
Nyamekey 2015	SLM	Ruostumaton teräs 316L	-	216

* Laskettu annetusta datasta

Energian ominaiskulutuksista huomataan, että energiankulutukset vaihtelevat suurella välillä. Erot johtuvat osittain tutkimuksissa valmistettujen kappaleiden eroista toisiinsa

nähdén. Esimerkiksi Gebben ja kumppaneiden tutkimuksen huomattavan suuri energiankulutus johtuu suurilta osin siitä, että valmistetun kappaleen tilavuus oli hyvin pieni verrattuna valmistustilavuuteen. Kappaleen tilavuus oli vain $0,5 \text{ cm}^3$, kun valmistustilavuus oli 18750 cm^3 (Gebbe et al. 2015) Myös Mognolin ja kumppaneiden tutkimuksessa valmistettu kappale oli hyvin pieni, 7 cm^3 , ja siitä löytyy vain valmistukseen käytetty energia eikä energian ominaiskulutusta (Mognol et al. 2006). Energian ominaiskulutuksen minimoimiseksi ei siis ole järkevää valmistaa vain yksittäisiä pieniä kappaleita vaan valmistaa mahdollisimman monta kappaletta kerralla. Kuvassa 3 on taulukosta 2 otetut täysien valmistusalojen energian ominaiskulutukset eri menetelmille.



Kuva 3, Eri jauhepetimenetelmien energiankulutusten jakaumat

Kuvasta nähdään kuinka energiankulutukset ovat jakautuneet eri menetelmien kesken ja kuinka paljon hajontaa esiintyy lasersulatuksessa. Taulukosta 2 ja kuvasta 3 huomataan, että elektronisuihkusulatuksen energian ominaiskulutus on menetelmistä selkeästi matalin, noin 60 MJ/kg , tulostettaessa mahdollisimman monta kappaletta kerralla. Tulostettaessa yksittäistä kappaletta elektronisuihkusulatusta ei kuitenkaan ole energiatehokkain menetelmä. Yksittäisten kappaleiden energian ominaiskulutukseen vaikuttaa huomattavasti valmistettujen kappaleiden koko. Kuvassa 4 on Faludin ja kumppaneiden tutkimukseen käyttämät valmistusaloat ja valmistettavien kappaleiden asetelut (2017, s. 147).



Kuva 4, *Faludin ja kumppaneiden tutkimuksen valmistusalustojen täyttö (2017, s. 147)*

Kuva 4 havainnollistaa hyvin sitä, että valmistettaessa yksittäisiä kappaleita, jää valmistusalustalle paljon käyttämätöntä tilaa, joka nostaa energian ominaiskulutusta jopa kaksinkertaiseksi. Tyhjää tilaa jää myös valmistettaessa useampia kappaleita, johtuen niiden muodosta. Tätä ylimääräistä tilaa voidaan kuitenkin hyödyntää lisäämällä pieniä kappaleita valmistettavaksi tyhjiin alueisiin.

Lasersulatuksen energiankulutukset vaihtelevat huomattavasti eri tutkimusten välillä. Huomataan esimerkiksi, että Faludin ja kumppaneiden tutkimuksessa useita kappaleita valmistettaessa on kulunut selkeästi enemmän energiaa muihin tutkimuksiin verrattuna. Tutkimuksen tuloksissa on mukana kappaleiden jäähdyttämiseen ja alustasta irrottamiseen käytetyt energiat (Faludi et al. 2017, s. 147). Suuremmissa arvoissa kappaleiden irrotukseen on käytetty lankakipinätyöstöä ja pienemmissä sahausta, joista ensimmäisen energiankulutus vaikuttaa paljon energian ominaiskulutukseen (Faludi et al. 2017).

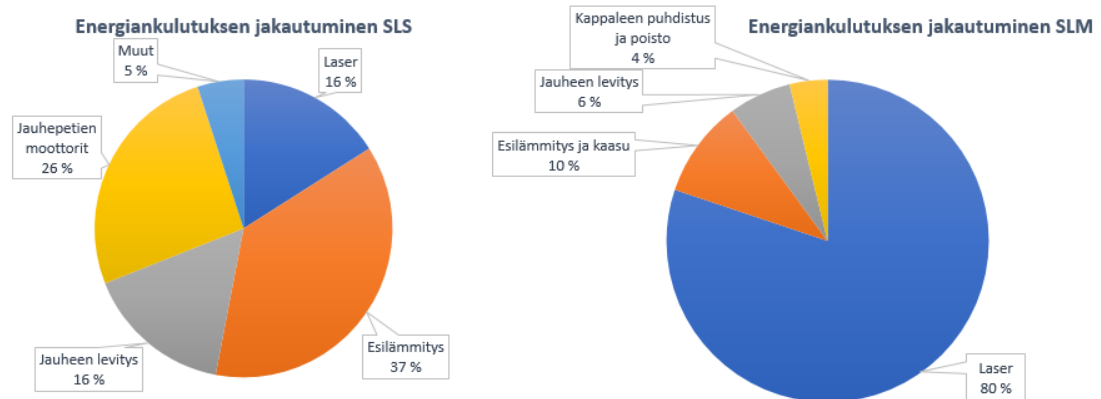
Metallin lasersintrauksen energian ominaiskulutuksen arvot asettuvat 250 MJ/kg lähes jokaisessa tutkimuksessa. Tätä voi selittää osin se, että kaikki tutkimukset ovat Baumersin ja kumppaneiden tekemiä ja tutkimuksissa on käytetty samaa materiaalia.

3.2 Osalaitteiden energiakulutus

Materiaalia lisäävien laitteiden energiankulutus voidaan jyvittää eri toimilaitteisiin. Tarkasteltavia eri toimilaitteita ovat sulatuksen energialähde, jauhepetejä liikuttavat sähkömoottorit, jauheen lämpötilan nostoon käytetyt lämmittimet, jauheen levitykseen käytettävät toimilaitteet, jäähdyttimet ja kappaleiden pohjasta irrottamiseen käytetyt laitteet.

Kuvassa 5 on diagrammeissa energiankulutuksen jakautuminen lasersintrausmenetelmässä ja lasersulatusmenetelmässä. Lasersintrauksen energiankulutuksen jakautuminen on Sreenivasanin ja Bourellin tutkimuksesta, jossa tulostettava materiaali oli nylonia, joten sitä ei voi suoraan olettaa paikkaansa pitäväksi metallisten tuotteiden valmistukseen (Sreenivasan & Bourell 2009, s. 262). Tulos antaa kuitenkin näkemyksen siitä, miten energiankulutus voisi jakautua. Lasersulatuksen energiankulutuksen jakaumat on laskettu

Kellensin ja kumppaneiden tutkimuksen arvoista. Tutkimuksessa käytettiin materiaalina ruostumatonta terästä. (Kellens et al. 2011, s. 7, 8, 9)



Kuva 5, Energiankulutuksen jakautuminen lasersintrauksessa ja lasersulatuksessa, perustuu lähteisiin (Sreenivasan & Bourell 2009, s. 259; Kellens et al. 2011, s. 8, 9)

Suurimpana erona energiankulutuksissa on sulatuksen aikaisen osuuden jakautuminen. Lasersintrauksessa laserin osuus on vain 16 %, joka on selkeästi pienempi kuin lasersulatuksessa, jossa osuus on 80 %. Kellensin ja kumppaneiden tutkimuksessa on mitattu myös eri toimilaitteiden tehonkulutuksia, mutta ei niiden energiankulutuksia (Kellens et al. 2011, s. 8).

Energiankulutuksen jakautumiseen eri osalaitteille vaikuttaa se, kuinka suuri osa tulostuspinta-alasta on käytössä. Tulostettaessa mahdollisimman täysi pöydällinen, vie jauheen sulatus suurimman osan energiasta ja ajasta. Pinta-alan pienentyessä prosessin muilla vaiheilla on suurempi osuus energiankulutuksessa. (Gutowski et al. 2017, s. 72) Muiden toimilaitteiden energiankulutuksien voidaan katsoa olevan lähes vakioita riippumatta tulostettavien kappaleiden määrästä. Näiden toimilaitteiden kokonaisenergiankulutus kuitenkin riippuu valmistettavien kappaleiden korkeudesta, joka määrittää sen, kuinka monta kertaa jauhetta tarvitsee levittää ja kuinka paljon valmistusalustaa tarvitsee laskea ja nostaa.

3.2.1 Jauheen esilämmitys

Metallijauheen ja valmistuskammion esilämmittäminen on tärkeää, sillä valmistettavissa tuotteissa on siten vähemmän jäännösjännityksiä ja niiden laatu on parempi. Esilämmitys myös kuluttaa huomattavan osan valmistuksen energiasta. (Papadakis et al. 2018, s. 1325) Lasersintrausprosessissa jauheen lämmitys on eniten energiaa kuluttava osa-alue sen viessä jopa 50 % kokonaisenergiasta (Dudek & Zagórski 2017, s. 7).

Metallijauheen esilämmitykseen on lasermenetelmissä käytettävissä kolme vaihtoehtoa: valmistusalustan esilämmitys, valmistuskammion esilämmitys ja laserilla lämmittäminen. Papadakis kumppaneineen tutki näiden kolmen eri menetelmän energiankulutuksen eroja (2018). Valmistusalustan ja -kammion esilämmitykset olivat molemmat 500 °C. Laserin lämmityksen laskettiin olevan 100 °C. Tutkimuksessa huomattiin, että laserin

käyttö esilämmityksessä on tehokasta, kun valmistusalustan pinta-alasta tarvitsee lämmit-
tää pieni osa eli kun valmistetaan yksittäisiä tai muutamia pieniä kappaleita. Muut esi-
lämmitykset sopivat paremmin suuremmalle kappalemäärälle ja poikkipinta-alalle. (Pa-
padakis et al. 2018, s. 1327, 1336) Esilämmitettäessä valmistusalustaa tai –kammiota on
energian kulutus lähes vakio jokaisella valmistuskerralla, sillä lämmitykseen vaadittava
aika ei vaihtelee eri kertojen välillä (Kellens et al. 2011, s. 7).

Elektronisuihkusulatuksessa jauheen esilämmityksen vaatima energia laskee kerrosten li-
sääntyessä, sillä alempiin kerroksiin jäänyt lämpö nostaa uuden jauhekerroksen lämpöti-
laa valmiiksi (Baumers et al. 2016, s. 161). Baumersin tutkimuksessa uuden jauhekerrok-
sen esilämmitykseen vaadittu energia laski noin 44 kJ:sta noin 25 kJ:een (Baumers 2012,
s. 135).

3.2.2 Laser ja elektronisuihku

Sähköisen energian muuttamisessa laserin energiaksi suuri osa energiasta muuttuu läm-
pöenergiaksi, joka ei johdu laitteen runkoon vaan laseria täytyy jäähdyttää erillisellä lait-
teella (Bourhis et al. 2013, s. 1935). Tämä kuluttaa paljon energiaa riippuen laserin pääl-
läolo ajasta.

Lasereiden ja elektronisuihkun tehot eroavat selkeästi toisistaan. Elektronisuihkusulatus-
laitteissa teho on 3000 W kun taas lasereissa tehot vaihtelevat 200 W:sta 500 W:iin ja
niitä voi olla useampia kuin yksi (Arcam AB a; Renishaw).

Laserin ja elektronisuihkun osuuteen energiankulutuksesta vaikuttaa valmistusalustan
koko. Valmistusalustan koon pienentyessä alkaa laserin osuus energiankulutuksesta kas-
vaa, sillä jauhepetejä liikuttavilla moottoreilla on vähemmän liikutettavaa massaa ja jau-
hetta tarvitsee levittää pienemmälle pinta-alalle (Paul & Anand 2012, s. 430).

3.2.3 Jauheen levitys ja jauhepetien moottorit

Jauheenlevityksen vaatima energia on lähes vakio jokaisella kerralla (Baumers et al.
2016, s. 161), sillä levitysprosessi on samanlainen joka kerroksella eikä jauheesta aiheu-
tuva vastus levittimeen muutu merkittävästi. Baumersin tutkimuksessa jauheenlevitys ku-
lutti elektronisuihkusulatusprosessissa jokaisella kerroksella noin 10 kJ energiaa
(Baumers 2012, s. 135). Levitykseen käytettävän energian kokonaiskulutukseen vaikuttaa
eniten valmistettavan kappaleen korkeus ja jauhekerroksen paksuus, jotka vaikuttavat sii-
hen, kuinka monta kertaa jauhetta tulee levittää alustalle.

Jauhepetejä liikuttavien moottorien osuus energiankulutuksesta johtuu siitä, että ne lii-
kuttavat jauheen massaa ylös- ja alaspäin kammioissa (Sreenivasan et al. 2010, s. 85).
Massan kasvaessa kasvaa myös moottorien energiankulutus. Kuten jauheen levityksessä,
myös valmistettavien kappaleiden korkeus vaikuttaa siihen kuinka paljon jauhepetiä tar-
vitsee liikuttaa.

3.2.4 Kappaleiden poisto ja jälkikäsittely

Valmiit kappaleet voidaan irrottaa valmistusalustasta erilaisilla menetelmillä, joista yksi on lankakipinätyöstö. Lankakipinätyöstössä metallia leikataan sähköisesti varatulla liikuvalla metallilangalla. Kappaleiden irrottaminen valmistusalustasta kuluttaa energiaa lankakipinätyöstöllä 142,46 MJ, jonka Baumers kumppaneineen yksinkertaisti tutkimuksessaan koskemaan kaikkia kappaleiden irrotuksia riippumatta kappaleiden poikkipinta-alasta. (Baumers et al. 2013, s. 422)

Kappaleiden irrottaminen valmistusalustasta perinteisillä koneistusmenetelmillä kulutti 28 % vähemmän energiaa kuin lankakipinätyöstöllä irrottaminen (Faludi et al. 2017, s. 154). Nyamekeyn tutkimuksessa kappaleiden poisto alustasta sahaamalla kulutti energiaa 1,23 MJ, joka on noin 1 % lankakipinätyöstön kuluttamasta energiasta (2015, s. 83). Vaihdamalla lankakipinätyöstö energiatehokkaampaan menetelmään saadaan huomattavia energiasäästöjä.

Mittatarkkoja kappaleita valmistettaessa jälkikäsittely voi olla tarpeellista, jos materiaalia lisäävällä valmistuksella ei päästä esimerkiksi tarpeeksi hyvään pinnanlaatuun. Kappaleiden pintoja voidaan koneistaa, sorvata, hioa tai käsitellä jollain muulla menetelmällä. Lisätyöt nostavat valmistukseen vaadittavaa energiankulutusta, jonka suuruus riippuu kappaleen koosta ja vaadittavan työn määrästä. Esimerkkinä Walachowiczin ja kumppaneiden tutkimus, jossa kaasuturbiinin polttimen kärjen viimeistely kulutti noin 10 MJ energiaa (2017, s. 208).

Kappaleisiin voidaan tarvita valmistuksessa myös tukia, jotka pitävät kappaleen oikean muotoisena ja, jotka täytyy poistaa valmistuksen jälkeen. Tukien poistaminen kuluttaa energiaa, joka nostaa valmistuksen energian kulutusta riippuen tukien määrästä.

3.3 Eri menetelmien eroja

Lasermenetelmät ja elektronisuihkusulatus eroavat toisistaan energiankulutuksessa, joten niiden eroista ja eroihin johtavista syistä on hyvä tietää. Elektronisuihkusulatuksessa jauhepetiä esilämmitetään elektronisuihkulla, jolla lämpötila saadaan tyhjiön ja hyvän energiansiirtokyvyn avulla nousemaan korkeaksi (Baumers et al. 2010, s. 283). Näin ollen erillisiä energiaa kuluttavia lämmittimiä ei tarvita toisin kuin lasermenetelmissä. Energiaa ei myöskään kulu kappaleiden irrottamiseen valmistusalustasta, johtuen valmistettavien kappaleiden ja valmistusalustan materiaalieroista (Baumers et al. 2016, s. 163).

Energiankulutuksien eroihin vaikuttaa lisäksi kerrospaksuuksien vaihtelu, mikä vaikuttaa siihen, kuinka monta kerrosta joudutaan sulattamaan ja näin ollen valmistusajat vaihtelevat (Baumers et al. 2010, s. 284). Pidempi valmistusaika lisää energiankulutusta huomattavasti. Elektronisuihkusulatuksessa jauhekerrokset ovat paksumpia kuin lasersulatuksessa, joten elektronisuihkusulatuksen energiankulutus on osin pienempää sen johdosta. Tämä kuitenkin heikentää esimerkiksi kappaleiden pinnanlaatua ja mittatarkkuuksia.

Eri menetelmien energiankulutuksen erot selittyvät myös sillä, että niissä käytetään eri metallijauheita, joiden sulatus vaatii toisistaan poikkeavat määrät energiaa. Elektronisuihkusulatuksessa käytetään usein titaanijauheseoksia, kun taas lasersulatuksessa käytetään myös muita metalliseoksia ja metalleja.

3.4 Jauheen valmistus

Titaanijauheseoksen kaasuatomisointiin levymateriaalista kuluu 30,1-33,3 MJ/kg energiaa. Jauheseoksen valmistamiseen kuluu kuitenkin kokonaisuudessaan noin 560 MJ/kg, kun otetaan huomioon myös titaanin valaminen levyiksi raaka-aineesta ja kierrätetyn materiaalin osuus. (Granta Design 2010, Baumers et al. 2016 mukaan, s. 163) Itse jauheen valmistaminen ei tuo suurta lisäystä energiankulutukseen, jos tarkastellaan kokonaisuutta.

Titaanijauheseoksen valmistus kuluttaa huomattavan paljon enemmän energiaa kiloa kohden kuin H13 työkaluteräs jauheen valmistus. Työkaluteräs jauheen valmistuksen ominaisenergian kulutus suoraa reittiä, eli teräksen kaasuatomisointi suoraan raakamateriaalin sulatuksen jälkeen, on noin 16 MJ/kg. Jauheen ominaisenergian kulutus epäsuoraa reittiä on puolestaan noin 26 MJ/kg. Atomisoinnin osuus kokonaisuudesta on molemmissa reiteissä noin 1 MJ/kg, joka on erittäin pieni verrattuna titaanijauheseoksen noin 30 MJ/kg arvoon. (Yule & Dunkley 1994, Morrow et al. 2007 mukaan, s. 937)

Eroja selittää esimerkiksi se, että tutkitun teräs jauheen partikkelikoko on pienimmillään noin kolme kertaa suurempi kuin titaanijauheen. Titaanijauheen valmistuksessa ei ole myöskään eroteltu atomisointiin kuluva energiaa, vaan siihen sisältyy myös materiaalin sulatus levyistä. (Yule & Dunkley 1994, Morrow et al. 2007 mukaan, s. 937; Baumers et al. 2016, s. 163) Titaanin erottaminen mineraaleista kuluttaa myös paljon energiaa (Baumers 2012, s. 219).

3.5 Suojakaasu

Valmistuksessa käytettäviin suojakaasuihin on sitoutunut energiaa niiden valmistuksen aikana. Argoniin valmistuksessa sitoutunut energia on noin 0,692 MJ/kg (Field et al. 1994, Kamps et al. 2018 mukaan, s. 53).

Valmistuksessa suojakaasuun kuluva energiankäyttö riippuu olosuhteiden luonnista ja siitä, että kierrättääkö valmistuslaite suojakaasua valmistuksen aikana. Jotkin laitteet eivät vaadi jatkuvaa kaasuvirtaa valmistuksen aikana, joten häviöitä ei tule sitä kautta, mutta kaasua ei kuitenkaan kerätä talteen valmistuksen päätyttyä (Faludi et al. 2017, s. 148) Faludin ja kumppaneiden tutkimuksessa arvioitiin kaasua kuluneen 0,208 kuutiometriä yhtä valmistuskertaa kohden (2017, s. 148). Tämä vastaa lähes Gebben ja kumppaneiden saamaa kulutusta, 0,31 m³, eri lasersulatuslaitteella (2015, s. 210).

Laitteissa, joissa kaasua virtaa jatkuvasti, suojakaasun kulutus riippuu valmistusajasta ja kaasun virtausnopeudesta. Kellensin ja kumppaneiden tutkimuksessa suojakaasun virtaus oli esilämmityksen ja olosuhteiden luonnin aikana $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ja valmistuksen aikana $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (2011, s. 9). Suojakaasua kului koko valmistuksen aikana yhteensä $15,5 \text{ m}^3$, joka on huomattavasti enemmän kuin Faludin ja kumppaneiden tutkimuksessa kuluneen kaasun määrä (Kellens et al. 2011, s. 10). Suojakaasun kulutusta saadaan siis pienennettyä sopivalla materiaalia lisäävällä laitteella, joka ei vaadi jatkuvaa kaasuvirtausta.

4. ENERGIATEHOKKUUS

Tässä luvussa käsitellään materiaalia lisäävän valmistuksen energiatehokkuutta ja siihen vaikuttavia asioita sekä keinoja energiatehokkuuden parantamiseksi. Energiatehokkuus liittyy materiaalia lisäävässä valmistuksessa myös kustannusten vähentämiseen ja voidaan huomata, että kustannustehokas valmistus on myös energiatehokasta (Baumers et al. 2013, s. 429).

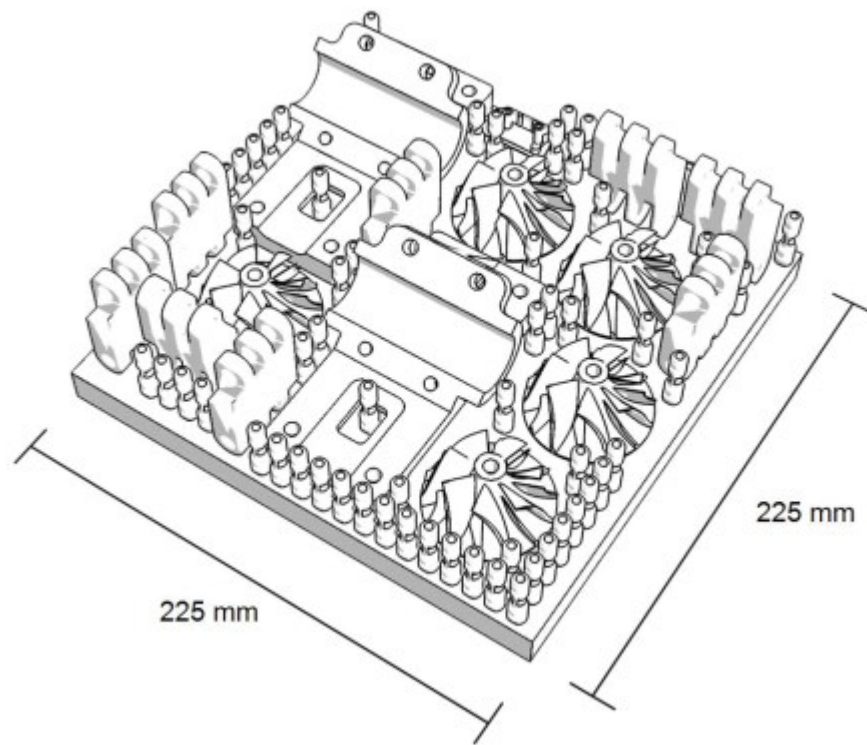
Materiaalia lisäävien menetelmien valmistusajat ovat pitkiä. Materiaalia lisäävän valmistuksen energiatehokkuutta saataisiin parannettua lyhentämällä eri valmistuksen osa-alueiden prosessiaikoja (Dudek & Zagórski 2017, s. 8). Valmistusaika on rajoittavin ja hallitsevin tekijä materiaalia lisäävän valmistuksen energiankulutuksessa (Gutowski et al. 2017).

4.1 Valmistustilavuuden täyttö

Materiaalia lisäävän valmistuksen energiankulutukseen vaikuttaa se, että valmistetaanko yksittäisiä kappaleita vai valmistetaanko mahdollisimman paljon kappaleita verrattuna valmistustilavuuteen. Erot ovat merkittäviä energian ominaiskulutuksen kannalta kuten taulukosta 2 huomattiin. Seuraavaksi tarkastellaan valmistustilavuuden täyttöön vaikuttavia asioita kuten pohjapinta-alan täyttöä ja valmistettavien kappaleiden korkeutta.

4.1.1 Pohjapinta-ala ja poikkipinta-ala

Energiankulutukseen vaikuttaa Baumersin ja kumppaneiden mukaan eniten laitteen käyttäjän kyky saada käytettävissä oleva valmistustilavuus mahdollisimman hyvin täytettyä (Baumers et al. 2012, s. 941). Kuvassa 6 on Baumersin ja kumppaneiden tutkimuksessaan käyttämä kappaleiden asettelu valmistusalustalle, joka tehtiin laskemalla algoritmin avulla paras mahdollinen asettelu. Pinta-ala-alkioista täyttyi 92,6 % ja valmistustilavuudesta 19,78 %. (Baumers et al. 2012, s. 938)



Kuva 6, Kappaleiden asettelu valmistusalustalle (Baumers et al. 2012, s. 939)

Kuvasta nähdään, että alustalla on useita pieniä kaasuttimen kurkkuja ja vain kaksi laakeripukkia. Laskemalla paras mahdollinen eri kappaleiden kokonaisuus, jolla saadaan pinta-ala hyödynnettyä parhaiten, ei välttämättä kuitenkaan vastata valmistettavien kappaleiden määrien tarpeeseen (Baumers et al. 2013, s. 427). Taulukossa 3 on Baumersin ja kumppaneiden tutkimuksessaan tekemät kokeet erilaisilla tuoteyhdistelmillä (Baumers et al. 2013, s. 428).

Taulukko 3, Pinta-ala-alkioiden täyttö ja energiankulutus, perustuu lähteeseen (Baumers et al. 2013, s. 428)

Koe	Kappalemäärä	Pinta-alan käyttö	Energiankulutus (MJ/cm ³)
A	85	92,59 %	1,96
B	21	79,80 %	2,07
C	14	62,27 %	2,20
D	5	26,32 %	3,01
E	3	50,07 %	2,26
F	23	82,37 %	2,01
G	145	97,53 %	2,49
H	1	16,69 %	3,61

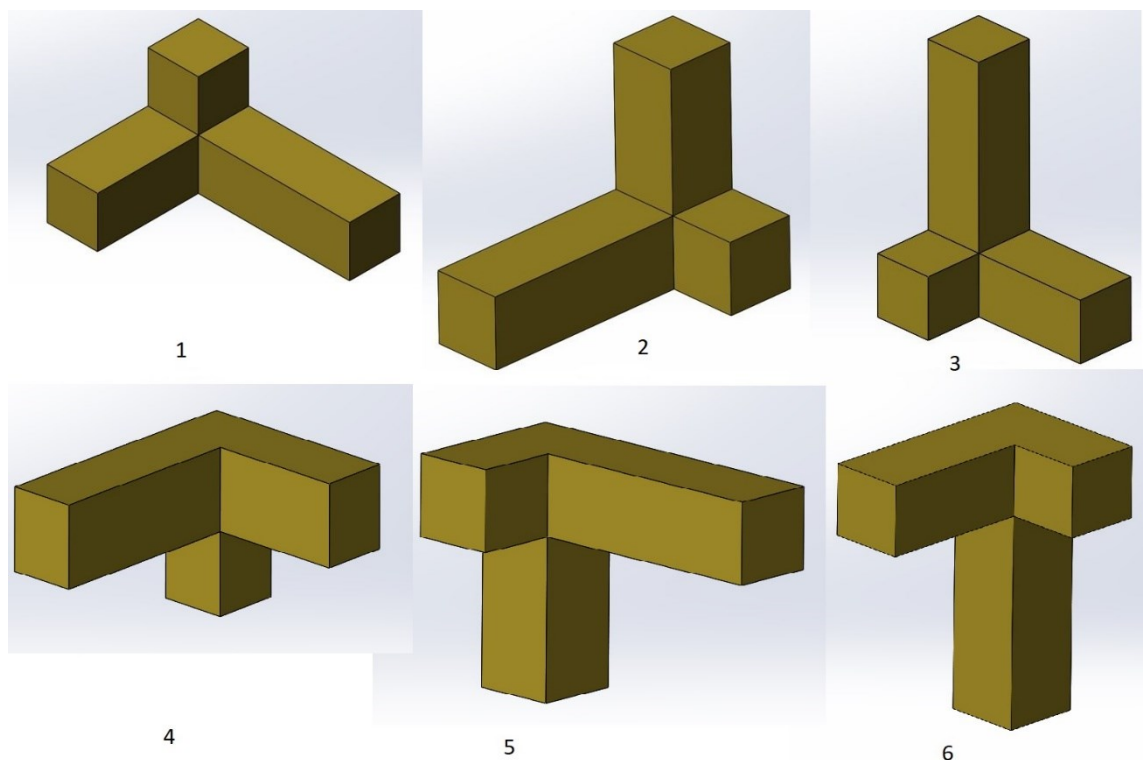
Taulukosta huomataan, että vaikka kokeessa G on suuri kappalemäärä ja pinta-ala-alkioista saadaan lähes kaikki käytettyä, on sen energian kulutus kokeissa keskitasolla. Li-

säksi huomataan, että kokeessa E saadaan noin 50 % alkioista täytettyä ja sen energiankulutus on kuitenkin pienempi kuin kokeessa G. Tuloksista voidaan päätellä, että valmistusalustan pinta-alan parempi täyttö ei yksistään määritä valmistuksen energiankulutusta ja energiatehokkuutta. Pienin energian kulutus on kokeella A, jonka asettelu valmistusalustalle löytyy myös kuvasta 6.

Eri kokeiden tulosten eroihin vaikuttaa pinta-alan täytön lisäksi valmistettavien kappaleiden korkeus. Lisäksi eroja selittää valmistettavien kappaleiden poikkipinta-alojen muuttuminen eri kerrosten kesken. Energiankulutus jauhekerrosta kohti riippuu poikkipinta-alan koosta (Baumers et al. 2013, s. 426). Kappaleen muotojen monimutkaisuudella on puolestaan vain erittäin heikko yhteys elektronisuihkusulatuksessa vaadittavaan energiaan (Baumers 2012, s. 136, 137). Pienin kokonaisenergian kulutus saadaan valmistamalla mahdollisimman pieniä kappaleita, mutta paremman energiatehokkuuden saavuttamiseksi tulisi valmistuspinta-ala hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti.

4.1.2 Kappaleen korkeus ja orientaatio

Kuvassa 7 on Mognolin ja kumppaneiden tutkimuksessaan käyttämät kappaleiden asetelut (Mognol et al. 2006, s. 4). Kappaleiden korkeudet tutkimuksissa olivat 20, 30 ja 40 mm (Mognol et al. 2006, s. 27).



Kuva 7, Tutkitut kappaleorientaatiot, perustuu lähteeseen (Mognol et al. 2006).

Kuvassa oleviin orientaatioihin 4, 5 ja 6 jouduttiin tekemään lisäksi tukirakenteita kannattelemaan kappaleen ulokkeita ja, jotka täytyi poistaa lopuksi. Tutkimuksessa saatujen

eri kappaleorientaatioiden energiankulutukset on koottu taulukkoon 4. Kappaleiden orientaatiolla pysty akselin suhteen ei ollut vaikutusta energiankulutukseen (Mognol et al. 2006, s. 32). Tällöin kappaleen poikkipinta-ala ja korkeus pysyivät jokaisella valmistuskerralla saman suuruisina.

Taulukko 4, Kappaleorientaatioiden energiankulutus, perustuu lähteeseen (Mognol et al. 2006, s. 32)

Orientaatio	Energiankulutus (kWh)
1	32
2	43
3	54
4	33
5	44
6	56

Tuloksista huomataan, että kappaleen korkeudella on selkeä merkitys valmistuksen energiankulutukseen. Orientaatio 2:n valmistaminen kulutti 34 % enemmän energiaa kuin ensimmäinen orientaatio ja kolmas orientaatio kulutti 69 % enemmän energiaa. Taulukosta 4 nähdään lisäksi, että tukien rakentaminen ei lisää merkittävästi energiankulutusta, mutta niiden poistamiseen kulunutta energiaa ei ole mukana.

Tuloksista voidaan päätellä, että valmistettavat kappaleet tulisi asetella valmistusalustalle mahdollisuuksien mukaan siten, että ne olisivat mahdollisimman matalia, jolloin valmistettavia kerroksia olisi mahdollisimman vähän ja valmistusaika mahdollisimman pieni. Koska kappaleiden orientaatiolla pysty akselinsa suhteen ei ole merkitystä energian kulutuksen suhteen, voidaan tätä hyödyntää kappaleiden asettelussa valmistusalustalle, jotta pinta-ala saadaan mahdollisimman hyvin täytettyä.

4.2 Valmistusaika

Materiaalia lisäävä valmistus ei ole nopea menetelmä valmistukseen. Valmistuserien tekemiseen voi mennä useita tunteja sisältäen laitteen esivalmistelut, kappaleiden valmistuksen ja jäähdyttämisen.

Tutkiessaan energiankulutusta, Gebbe kumppaneineen määritteli lasersulatuslaitteen tuottamattoman työn osuudeksi 82 % valmistusajasta. Tuottavan työn osuus 18 %, koostui uuden jauhekerroksen levittämisestä ja sulattamisesta. Energiankulutuksesta tuottamattoman työn osuus oli noin 44 %. (Gebbe et al. 2015, s. 210) Tutkimuksessa tulostetun kappaleen tilavuus oli huomattavasti pienempi kuin valmistustilavuus, joten tulostamalla useampia kappaleita kerralla, tasoittuisivat tuottamattoman ja tuottavan työn valmistusaikojen erot. Tulostettaessa kokonaan täytetty pöydällinen, tulostuksen osuus valmistusajasta nousee jopa 90 %:iin (Gutowski et al. 2017, s. 72).

Valmistusaikaan vaikuttaa lasereiden ja elektronisuihkujen skannausnopeudet. Lasereiden skannausnopeudet sulatuksessa vaihtelevat 800 mm/s ja 1200 mm/s välillä (Murr et

al. 2012, s. 3; Kamps et al. 2018, s. 51). Elektronisuihkun suurin siirtonopeus on 8000 m/s ja skannaustrategioiden avulla sulatuksesta saadaan nopeaa (Arcam AB a; Gibson et al. 2015, s. 140).

Paremmen energiatehokkuuden tavoittelemiseksi tulisi keskittyä pienentämään energiankulutusta tuottavissa vaiheissa ja tuottamattoman työn vaiheissa lisäksi lyhentää prosessiaikoja. Valmistusaikoja saataisiin lyhyemmäksi esimerkiksi nopeammilla ja tehokkaammilla lasereilla tai käyttämällä useampaa kuin yhtä laseria valmistuksessa. Valmistusaikaa saisi myös lyhyemmäksi käyttämällä paksumpia jauhekerroksia, mutta se ei välttämättä palvelisi tuotteen laatuvaatimuksia.

4.3 Jauheen kierrätys

Ylijääneestä metallijauheesta saadaan käytettyä lähes kaikki uudestaan ja laitteeseen lisätään uutta jauhetta sen verran kuin edellisessä rakennuksessa sitä on kulunut valmiisiin kappaleisiin ja jätteeseen, jos valmistettava tuote ei ole sellainen, että se täytyy valmistaa kokonaan neitseellisestä jauheesta (Faludi et al. 2017, s. 147). Jauheen ominaisuudet eivät muutu merkittävästi jauheen siivilöinnin jälkeen, mutta kierrätyksen tarve kasvaa, kun samaa jauhetta käytetään useissa valmistuskerroissa (Slotwinski et al. 2014, s. 482).

Materiaalihävikkiä syntyy jauheen käsittelyssä ja valmistuksen aikana. Gebben kumppaneineen tekemässä tutkimuksessa 1 605 g:aa kohti jauheesta ja käsittelystä syntyi yhteensä 135 g:aa hävikkiä eli noin 8,4 % (Gebbe et al. 2015, s. 210). Tulokseen vaikuttaa kuitenkin valmistetun kappaleen huomattavan pieni koko, 3,8 g, verrattuna jauheen kokonaismäärään (Gebbe et al. 2015, s. 210).

Kellensin ja kumppaneiden tutkimuksessa syntyi kiloa valmista tuotetta kohti 0,204 kg jätettä jauheesta (Kellens et al. 2011, s. 9). Toisessa tutkimuksessa eri kokeissa materiaalihäviöt olivat 59-63,3 % valmiiden kappaleiden massasta (Lutter-Günther 2017, Kamps et al. 2018 mukaan, s. 53). Väitöskirjansa tutkimuksessa Nyamekey sai materiaalihävikiksi 0,92 % verrattuna jauhesäiliöön laitettuun jauheen massa. Valmiiden kappaleiden massa verrattuna materiaalihävikki oli 43 %. (Nyamekey 2015, s. 79)

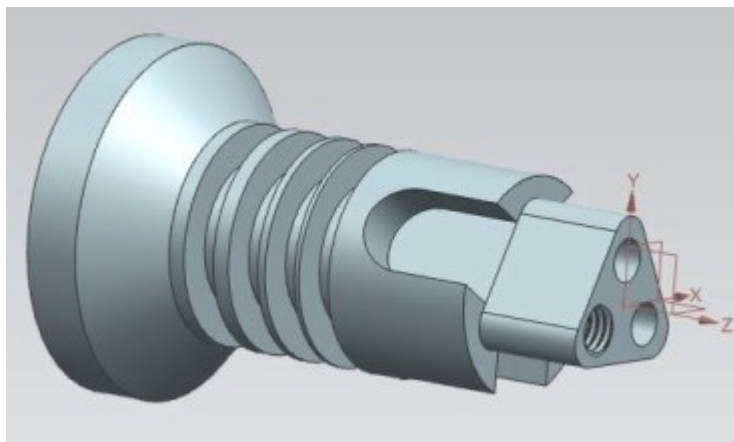
Eri tuloksista huomataan, että hävikin määrä vaihtelee huomattavan paljon eri tutkimuksissa. Energiankulutuksen kannalta jauheen kierrätyksellä ja jätteen minimoimisella on merkitystä, sillä jauheeseen on sen valmistuksessa sitoutunut energiaa ja sen osuus tuotteen elinkaaren energiankulutuksesta voi olla merkittävä.

5. VERTAILU KONEISTUKSEEN

Tässä luvussa tarkastellaan materiaalia lisäävän valmistuksen energiankulutuksen eroja perinteisiin valmistusmenetelmiin. Kirjallisuudesta löytyvissä tutkimuksissa jauhepetimenetelmiä on vertailtu CNC-koneistuksen kanssa siinä, kuinka paljon niiden valmistusprosessien energiankulutukset eroavat. Osassa tutkimuksia on otettu huomioon myös metallijauheen valmistukseen kulunut energia.

Yksi ero koneistuksen ja materiaalia lisäävän valmistuksen välillä on valmistettavien kappaleiden geometriat. Materiaalia lisäävällä valmistuksella voitiin valmistaa ontoja kappaleita, toisin kuin koneistamalla, mutta samoja kappaleita keskenään verratta lasersulatus kulutti kymmenkertaisen määrän energiaa koneistukseen nähden (Nyamekey 2015, s. 97). Jauhepetimenetelmillä voidaan siis valmistaa tuotteita ja piirteitä, joita ei ole mahdollista tai on hankalaa valmistaa koneistamalla. Jauhepetimenetelmän haittapuolena on suuremman energiankulutuksen lisäksi valmistettavien kappaleiden pinnat, jotka ovat koneistettujen kappaleiden pintoja huonolaatuisemmat ja voivat vaatia jälkikäsittelyä (Nyamekey 2015, s. 79).

Kahya kumppaneineen (2018) tutki sorvauksen ja lasersintrauksen energiankulutuksia valmistettaessa titaanista testikappale. Tutkimuksessa otettiin huomioon vain valmistusprosessin vaatima energia eikä siinä otettu huomioon esimerkiksi materiaaliin sitoutunutta energiaa. Valittu testikappale oli geometrialtaan monimutkainen ja se löytyy kuvasta 8. Tutkimuksen tuloksena saatiin sorvauksen kuluttamaksi energiaksi 3,6 MJ ja lasersintraukselle puolestaan 38,7 MJ. (Kahya et al. 2018, s. 10) Lasersintrauksen energia on noin kymmenkertainen verrattuna sorvaukseen, mikä vastaa Nyamekeyn saamaa tulosta. Tutkimuksessa lasersintrauksen tehon tarve oli viisi kertaa pienempi kuin sorvauksen, mutta valmistusaika 70 kertaa pidempi (Kahya et al. 2018, s. 10).

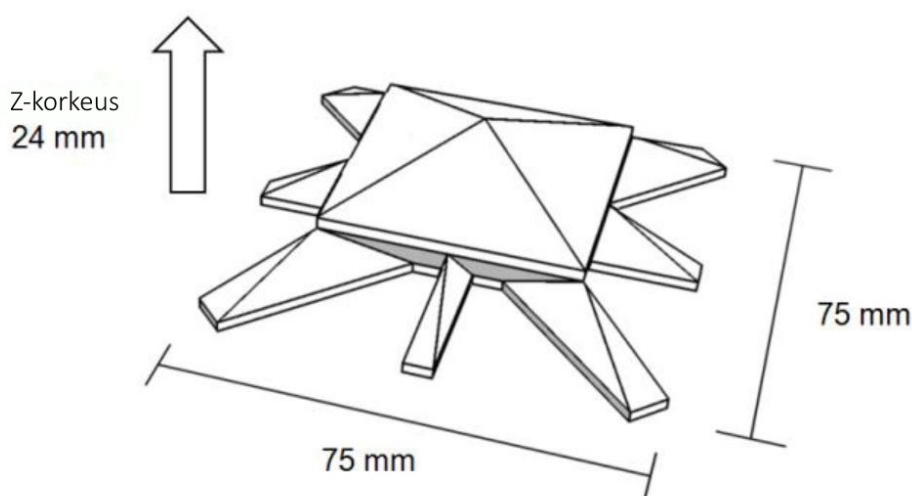


Kuva 8, Testikappale (Kahya et al. 2018, s. 7)

Kuvasta nähdään, että testikappaleessa on useita erilaisia valmistettavia muotoja. Testikappale oli kooltaan pieni ja sen massa oli 13,705 grammaa (Kahya et al. 2018, s. 7).

Paris kumppaneineen tutki titaanisen turbiinin siipipyörän valmistuksen elinkaaren vaikutuksia materiaalia lisäävässä valmistuksessa ja koneistuksessa (2016). Materiaalia lisäävänä menetelmänä oli elektronisuihkusulatus, jossa tarvittiin lisäksi lopuksi koneistusta pintojen viimeistelyyn (Paris et al. 2016, s. 31). Valmistettavan turbiinin siipipyörän koko oli $53,56 \text{ cm}^3$ ja koneistuksessa käytetty alkuperäinen aihio 406 cm^3 (Paris et al. 2016, s. 30). Koneistuksen kesto oli 5 h 53 min ja energiankulutus 27,5 kWh, kun taas elektronisuihkusulatuksen ja viimeistelyn kesto oli 2 h 5 min ja energiankulutus 8,3 kWh (Paris et al. 2016, s. 31) Elektronisuihkusulatus on tässä tutkimuksessa energiatehokkaampi menetelmä verrattuna koneistukseen ja lisäksi valmistusajaltaan nopeampi.

Baumers tutki väitöskirjassaan materiaalia lisäävän valmistuksen ja CNC-koneistuksen eroja energiankulutuksessa. Taulukossa 5 on Baumersin tutkimuksessaan käyttämiä arvoja ja saatuja tuloksia. Baumers käytti tutkimuksessaan elektronisuihkusulatuslaitetta, jolla hän valmisti viisi kappaletta ja laski niistä yhden kappaleen kuluttaman energian. Kuvassa 9 on tutkimuksessa käytetty testikappale. (Baumers 2012, s. 88, 148, 217)



Kuva 9, Testikappale (Baumers 2012, s. 88)

Kuvasta huomataan, että testikappale ei ole yksinkertainen muodoiltaan ja koneistukseen se on monimutkainen. Baumers on kuitenkin käyttänyt koneistukselle kirjallisuudesta löytyneitä arvoja poistettuun materiaalin sitoutuneeseen energiaan. Hän on käyttänyt ylä- ja alarajoja, mistä johtuu prosessin energiankulutuksen vaihtelu (Baumers 2012, s. 218).

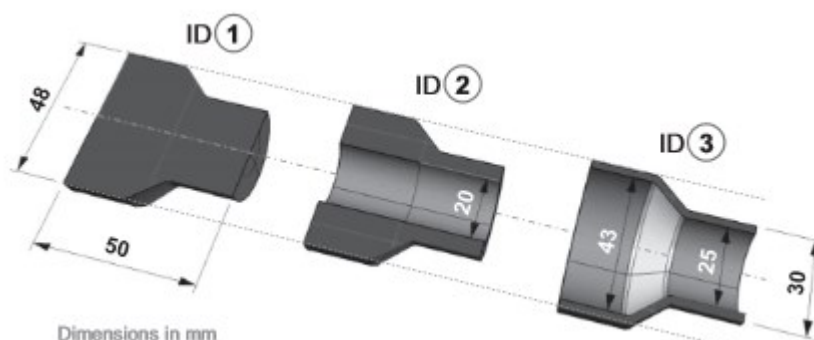
Taulukko 5, *Elektronisuihkusulatuksen ja CNC-koneistuksen vertailu, perustuu lähteeseen (Baumers 2012, s. 218)*

	EBM	CNC
Prosessiin käytetty massa (g)	130,61	598,05
Valmiin kappaleen massa (g)	130,61	130,61
Materiaaliin sitoutunut energia (MJ)	73,22	316,31
Prosessin kuluttama energia per kappale (MJ)	7,83	3,05 - 11,22
Energiankulutus per kappale (MJ)	81,05	319,36 - 327,53

Taulukosta huomataan, että materiaaliin sitoutunut energia vaikuttaa eniten valmistettavan tuotteen energiankulutukseen. Elektronisuihkusulatuksessa materiaaliin sitoutuneen energian osuus kokonaisuudesta on noin 90 % ja CNC-koneistuksessa 96-99 %. Materiaaliin sitoutuneen energian määrä on suuri, sillä käytetty materiaali oli titaaniseosta, johon on sitoutunut paljon energiaa.

Valmistusprosessien energiankulutukset ovat lähellä toisiaan toisin kuin Nyamekeyn sekä Kahyan ja kumppaneiden tutkimuksissa. Eroa selittää osin se, että Baumersin tutkimuksessa käyttämä laite käyttää elektronisuihkua, joka on laseria energiatehokkaampi menetelmä. Eroon vaikuttaa lisäksi se, että koneistuksen energiankulutus perustuu laskettuihin arvoihin eikä mittaukseen.

Priaronen ja kumppaneiden tutkimuksessa laskettiin kirjallisuuden pohjalta energiankulutuksille arvot (2017). Kuvassa 10 on tutkimuksessa valmistetut testikappaleet (2017, s. 193).



Kuva 10, *Tutkimuksessa tarkastellut testikappaleet (Priarone et al. 2017, s. 193)*

Priaronen ja kumppaneiden tutkimuksessa (2017) vertailtaessa koneistusta elektronisuihkusulatukseen, huomattiin, että koneistaminen oli energiatehokkaampaa kahden ensimmäisen kappaleen kohdalla, mutta kolmannessa elektronisuihkusulatus kulutti selvästi vähemmän energiaa. Tutkimuksessa otettiin huomioon materiaalin valmistus ja itse

kappaleen valmistus. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa metalliharkkojen valmistukseen kulunut energia oli noin puolet kokonaisenergian kulutuksesta, kun taas koneistuksessa materiaaliin kului 82-88 prosenttia kokonaisenergiasta. Materiaalia lisäävässä valmistuksessa harkkojen kaasuatomisointi kuitenkin nosti vielä materiaaliin sitoutunutta energiaa ja koneistuksessa harkkojen muotoilu. Elektronisuihkusulatus kulutti noin 40 prosenttia energiasta, kun koneistettaessa lastuamisen osuus kokonaisuudesta oli noin kuuden ja kymmenen prosentin välillä. Elektronisuihkusulatuksella valmistetut kappaleet vaativat lisäksi pinnan viimeistelyä, mutta sen osuus ei ollut suuri verrattuna sulatuksen vaatimaan energiaan. (Priarone et al. 2017, s. 198)

Tutkimuksen tuloksista huomattiin, että elektronisuihkusulatuksessa energiankulutus kappaletta kohti laski kappaleiden massan pienentyessä. Koneistuksen energiankulutus kasvaa kappaleen monimutkaisuuden lisääntyessä, kun taas elektronisuihkusulatuksessa energiankulutus pienenee materiaalin kulutuksen ja sulatuksen vähentyessä. (Priarone et al. 2017, s. 198)

Materiaalia lisäävä valmistus on energiatehokkain vaihtoehto, kun valmistettavat kappaleet ovat monimutkaisia koneistettavaksi. Myös materiaalia lisäävällä menetelmällä on merkitystä energiatehokkuuteen, kuten huomataan lasersulatuksen ja elektronisuihkusulatuksen eroista. Materiaalia lisäävän valmistuksen ympäristöetuihin kuuluu lisäksi tuotteiden parempi suorituskyky, pienempi raaka-aineiden kulutus ja logistiikkaan vaadittujen välimatkojen lyheneminen. Myöskään valmistuksessa ei tarvita ympäristölle haitallisia leikkuunesteitä ja valmistuksen energiantensiivisyys on pienempi kuin valamisessa. (Peng 2016, s. 63)

6. YHTEENVETO

Materiaalia lisäävien jauhepetimenetelmien energiankulutus koostuu eri toiminnoista, joiden energiankulutus on riippuvainen valmistettavien kappaleiden poikkipinta-alasta ja korkeudesta. Energiankulutus on joissain toimilaitteissa, kuten jauheen levittimessä, lähes vakio jokaisella uudella jauhekerroksella ja sen kokonaisenergian kulutus riippuu kerrosten määrästä. Laserin ja elektronisuihkun energiankulutukset puolestaan riippuvat valmistettavien kappaleiden poikkipinta-alasta ja kerrosten määrästä. Valmistuksen energian kulutusta lisäävät muun muassa tukien tarve ja valmiin tuotteen viimeistely.

Energian ominaiskulutuksen minimoimiseksi ja energiatehokkuuden parantamiseksi tulisi valmistettavien kappaleiden täyttää valmistustilavuus mahdollisimman hyvin korkeimman valmistettavan kappaleen mukaan. Mahdollisuuksien mukaan kannattaa kappaleiden korkeus pitää mahdollisimman pienenä, jolloin saadaan minimoitua tarvittavien valmistuskerrosten määrä. Materiaalia lisäävän valmistuksen energiatehokkuuden rajoitukset tulevat lisäksi pitkästä valmistusajasta. Valmistusaikoja saadaan lyhyemmäksi esimerkiksi useammilla ja tehokkaammilla lasereilla.

Materiaalia lisäävä valmistus ei ole aina energiatehokkaampaa verrattuna perinteisiin menetelmiin kuten koneistukseen. Materiaalia lisäävä valmistus on kuitenkin energiatehokkaampaa valmistettaessa pieniä ja geometrisesti monimutkaisia kappaleita. Energiatehokkuutta lisää raaka-aineiden pienempi kulutus verrattuna perinteisiin menetelmiin, joissa poistetusta materiaalista tulee paljon energiankulutusta. Materiaalia lisäävän valmistuksen energiatehokkuuden minimoimiseksi tulee yhdistää ja arvioida eri tekijöitä, jotka vaikuttavat energiankulutukseen ja valita niistä paras yhdistelmä omaa tuotantoa ajatellen.

Uutta tutkimusta tarvitaan energiatehokkuudesta, sillä tutkimuksissa käytetyt laitteet ovat nyt jo osittain vanhentuneita, kuten esimerkiksi elektronisuihkusulatuslaite Arcam A1, jota ei enää valmisteta. Lasersulatuslaitteisiin on myös tullut parannuksia, kuten useampia lasereita, mikä esimerkiksi lyhentää valmistusaikaa verrattuna tutkimuksissa käytettyihin yhden laserin laitteisiin.

LÄHTEET

Arcam AB a, Arcam Brochure, [verkkojulkaisu] Saatavissa (30.3.2018): <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcamebm-corp-brochure-fnlv3.pdf>

Arcam AB b, EBM Hardware, Saatavissa (30.3.2018): <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/>.

Baumers, M., (2012), Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption, Loughborough University, 256 p. Saatavissa: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10768>.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I. & Hague, R. (2011). Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter?, Proceedings of the 23rd Solid Freeform Fabrication Symposium 2011, pp. 30-40.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E. & Hague, R. (2012). Combined build-time, energy consumption and cost estimation for direct metal laser sintering, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium, The University of Texas at Austin, pp. 932-944.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I. & Hague, R. (2016). Shape Complexity and Process Energy Consumption in Electron Beam Melting: A Case of Something for Nothing in Additive Manufacturing?, Journal of Industrial Ecology, Vol. 21, (S1), pp. 157-167.

Baumers, M., Tuck, C., Hague, R., Ashcroft, I. & Wildman, R. (2010). A comparative study of metallic additive manufacturing power consumption, 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010, USA, pp. 278-288.

Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E. & Hague, R. (2013). Transparency Built-in Energy Consumption and Cost Estimation for Additive Manufacturing, Journal of Industrial Ecology, Vol. 17(3), pp. 418-431.

Bourhis, F.L., Kerbrat, O., Hascoet, J. & Mognol, P. (2013). Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 69(9), pp. 1927-1939.

Dudek, P. & Zagórski, K. (2017). Cost, resources, and energy efficiency of additive manufacturing, E3S Web of Conferences 14, 01040, 8 p.

European Powder Metallurgy Association (2017). Introduction to Additive Manufacturing Technology, 51 p. Saatavissa: <https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-additive-manufacturing-brochure>.

Faludi, J., Baumer, M., Maskery, I. & Hague, R. (2017). Environmental Impacts of Selective Laser Melting: Do Printer, Powder, Or Power Dominate? *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21(S1), pp. 144-156.

Frazier, W.E. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23(6), pp. 1917-1928.

Gebbe, C., Lutter-Günther, M., Greiff, B., Glasschröder, J. & Reinhart, G. (2015). Measurement of the Resource Consumption of a Selective Laser Melting Process, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 805, pp. 205-212.

Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*, 2nd ed. Springer-Verlag New York, New York, USA, 498 p.

Gutowski, T., Jiang, S., Cooper, D., Corman, G., Hausmann, M., Manson, J., Schudeleit, T., Wegener, K., Sabelle, M., Ramos-Grez, J. & Sekulic, D.P. (2017). Note on the Rate and Energy Efficiency Limits for Additive Manufacturing, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21(S1), pp. 69-79.

Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals, *Acta Materialia*, Vol. 117, pp. 371-392.

Kahya, M., Durlu, N., Eroğul, O., Demir, O., Unver, H.O. & Serin, G. (2018). A Comparative Study of Energy Consumption of Selective Laser Sintering and Turn-mill Machining, *The 17th International Conference on Machine Design and Production*, Bursa, Turkiye, 13 p.

Kamps, T., Lutter-Günther, M., Seidel, C., Gutowski, T. & Reinhart, G. (2018). Cost- and energy-efficient manufacture of gears by laser beam melting, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 21, pp. 47-60.

Kellens, K., Yasa, E., Renaldi, Dewulf, W., Kruth, J.P. & Duflou, J. (2011). Energy and resource efficiency of SLS/SLM processes, *Proceedings of the 23rd Solid Freeform Fabrication Symposium 2011*, pp. 1-16.

Mognol, P., Lepicart, D. & Perry, N. (2006). Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12(1), pp. 26-34.

Morrow, W.R., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J. & Skerlos, S.J. (2007). Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15(10), pp. 932-943.

Murr, L., Gaytan, S., Ramirez, D.A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K.N., Shindo, P.W., Medina, F.R. & Wicker, R.B. (2012). Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 28(1), pp. 1-14.

Nyamekey, P. (2015). Energy and raw material consumption analysis of powder bed fusion: case study: CNC machining and laser additive manufacturing, Lappeenranta University of Technology, 108 p. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201503161940>.

Papadakis, L., Chantzis, D. & Salonitis, K. (2018). On the energy efficiency of pre-heating methods in SLM/SLS processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 95(1), pp. 1325-1338.

Paris, H., Mokhtarian, H., Coatanéa, E., Museau, M. & Ituarte, I.F. (2016). Comparative environmental impacts of additive and subtractive manufacturing technologies, *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, Vol. 65(1), pp. 29-32.

Paul, R. & Anand, S. (2012). Process energy analysis and optimization in selective laser sintering, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 31(4), pp. 429-437.

Peng, T. (2016). Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes, *Procedia CIRP*, Vol. 40 pp. 62-67.

Priarone, P.C., Ingarao, G., di Lorenzo, R. & Settineri, L. (2017). Influence of Material-Related Aspects of Additive and Subtractive Ti-6Al-4V Manufacturing on Energy Demand and Carbon Dioxide Emissions, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21(S1), pp. 191-202.

Renishaw, Metal additive manufacturing (3D printing) systems, Saatavissa (6.4.2018): <http://www.renishaw.com/en/metal-additive-manufacturing-3d-printing-systems--37011>.

Sames, W.J., List, F.A., Pannala, S., Dehoff, R.R. & Babu, S.S. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International Materials Reviews*, Vol. 61(5), pp. 315-360.

Shellabear, M. & Nyrhilä, O. (2004). DMLS - Development History and State of the Art, LANE 2004 conference, Sept. 21-24, 2004, Erlangen, Saksa, 12 p.

Slotwinski, J.A., Garboczi, E.J., Stutzman, P.E., Ferraris, C.F., Watson, S.S. & Peltz, M.A. (2014). Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 119(1), pp. 460-493.

Sreenivasan, R. & Bourell, D. (2009). Sustainability Study in Selective Laser Sintering – An Energy Perspective, 20th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2009 - Austin, Texas, USA, Aug 3-5, 2009 pp. 257-265.

Sreenivasan, R., Goel, A. & Bourell, D.L. (2010). Sustainability issues in laser-based additive manufacturing, Physics Procedia, Vol. 5(1), pp. 81-90.

Tilastokeskus, Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkköjulkaisu].

ISSN=1799-795X, 2016, Helsinki:
 Saatavissa (11.3.2018): http://www.stat.fi/til/ehk/2016/ehk_2016_2017-12-08_tie_001_fi.html

Vayre, B., Vignat, F. & Villeneuve, F. (2012). Metallic additive manufacturing: State-of-the-art review and prospects, Mechanics and Industry, Vol. 13, Iss. 2, pp. 89-96.

Walachowicz, F., Bernsdorf, I., Papenfuss, U., Zeller, C., Graichen, A., Navrotsky, V., Rajvanshi, N. & Kiener, C. (2017). Comparative Energy, Resource and Recycling Lifecycle Analysis of the Industrial Repair Process of Gas Turbine Burners Using Conventional Machining and Additive Manufacturing, Journal of Industrial Ecology, Vol. 21, (S1), pp. 203-215.